

APPROCCIO MULTI-DISCIPLINARE AL PROBLEMA DELLA SUBSIDENZA NELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA

Paolo Baldi¹, Nicola Cenni², Fabiana Loddo³, Giovanni Martinelli⁴, Marco Moro⁵, Arianna Pesci³, Michele Saroli^{5,6,7}, Salvatore Stramondo⁵

¹ Dipartimento di Fisica, Settore di Geofisica, Università degli Studi di Bologna.

² Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena.

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna.

⁴ A.R.P.A. Regione Emilia Romagna. Sezione di Reggio Emilia.

⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma.

⁶ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

⁷ Facoltà di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Cassino.

RIASSUNTO

L'estrazione di fluidi sotterranei ha prodotto significativi fenomeni di subsidenza nel territorio della Regione Emilia-Romagna. Al fine di analizzare il fenomeno, per meglio comprenderne l'origine e gli aspetti evolutivi, è stato utilizzato un approccio multidisciplinare basato su innovativi sistemi di controllo delle quote piezometriche dei pozzi e degli spostamenti della superficie topografica. In particolare mediante la tecnica di interferometria DInSAR – SBAS sono state elaborate 52 immagini distribuite su un'area compresa tra l'Appennino bolognese e il fiume Po. E' stata inoltre studiata l'evoluzione temporale delle quote piezometriche dei pozzi presenti in Regione, con lo scopo di evidenziare aree potenzialmente soggette a subsidenza confrontabile con i dati di spostamento al suolo DInSAR e con dati geodetici (livellazioni e dati GPS). Un significativo miglioramento della conoscenza dei fenomeni di subsidenza potrà avvenire integrando i risultati ottenuti con i dati forniti dalla nuova rete di stazioni GPS permanenti progettata congiuntamente dall'INGV e dall'Università di Bologna. L'analisi di dati geologici, idrogeologici, telerilevati e geodetici ha portato a risultati significativi per una corretta comprensione dei processi di subsidenza su buona parte della città di Bologna e della sua provincia. Tale approccio verrà esteso a tutta l'area compresa tra la catena appenninica ed il fiume Po.

1. INTRODUZIONE

La subsidenza è un fenomeno presente su gran parte del territorio della Regione Emilia Romagna ed è causata da vari processi naturali, quali quelli di origine geodinamica e tettonica, processi di compattazione naturale dei sedimenti, ecc. (Carminati et al., 2003). La causa più rilevante è di origine antropica ed è dovuta all'estrazione di acque sotterranee e di idrocarburi (e.g. Carminati e Martinelli, 2002). Studi di carattere isotopico (Martinelli et al., 1998; Chahoud et al., 2002; Dadomo e Martinelli, 2005 e bibliografia citata) hanno dimostrato in modo allarmante la scarsa o nulla capacità di ricarica della maggior parte degli acquiferi indispensabili per l'irrigazione delle coltivazioni, per l'industria e per gli impieghi civili nelle città. Molti acquiferi a sud del fiume Po sono infatti di carattere confinato e ospitano acque caratterizzate da età comprese tra i 5.000 e i 100.000 anni (Chahoud et al., 2002). Attualmente esistono mappe di abbassamento ricavate da misure topografiche di livellazione e campagne GPS che hanno evidenziato forti accelerazioni della subsidenza in coincidenza dei centri urbani dove gli acquiferi sono intensamente sfruttati; in alcune aree sono state misurate velocità di abbassamento superiori a 5 cm/anno (Bitelli et al. 2005).

1.2 Assetto Geologico

L'area in subsidenza della Regione Emilia Romagna è collocata nel settore meridionale della Pianura Padana, delimitata a sud dall'Appennino Settentrionale. La Pianura Padana è relativamente recente costituendo, sino a meno di 1 milione di anni di anni fa, l'estrema propaggine nord-occidentale del Mare Adriatico. Questa può essere considerata come il risultato di un *foreland basin* in evoluzione (Doglioni, 1993; Mariotti e Doglioni, 2000; Pieri e Groppi, 1981; Pieri 1983) compreso tra il fronte degli opposti sovrascorrimenti sepolti delle falde sud vergenti (Alpi

Meridionali) e nord vergenti (Appennino Settentrionale). Dal Piemonte all'Adriatico, i grandi sovrascorrimenti sepolti nord vergenti dell'Appennino Settentrionale delineano l'Appennino sepolto coinvolto in catena (Boccaletti et al. 1985; Castellarin et al. 1985) e caratterizzato da strutture positive antiformi, con analoghe strutture in sprofondamento di tipo sinforme. L'area in subsidenza della Regione Emilia Romagna può quindi essere considerata appartenente ad un bacino peristrutturale sintettonico. L'evoluzione del bacino è connessa all'attivazione dei sovrascorrimenti del basamento e/o a riattivazioni di sovrascorrimenti preesistenti della copertura (Boccaletti e Sani, 1997). Le principali unità tettoniche coinvolte sono riferibili a tre principali domini: il dominio Ligure, il dominio Tosco – Umbro – Marchigiano e le coperture plio – quaternarie marino – continentali. In particolare l'area di studio si colloca in prossimità del limite morfologico appennino – pianura, costituito dalle colline del basso Appennino e dalla fascia pedemontana appartenente alla Pianura Padana. Si tratta di due ambienti diversi tra loro ma strettamente correlati come evoluzione. In particolare l'area di pianura, in cui si esplica maggiormente il fenomeno della subsidenza, è costituita dalla fascia pedemontana. Questa rappresenta il raccordo fra il settore esterno della catena strutturata nel Miocene Superiore – Pliocene Inferiore e il settore padano – adriatico in cui le deformazioni sepolte sono prevalentemente riferibili al Pliocene Superiore – Quaternario e parte delle quali considerabili tuttora attive (Boccaletti et al. 1985; Amorosi et al. 1996; Boccaletti et al., 2004). La maggior parte dei fluidi sotterranei, in particolare acqua, al margine della dorsale dell'Appennino settentrionale, risiede nei depositi marini e continentali di età Plio – quaternaria che costituiscono il riempimento del bacino peristrutturale padano legato all'orogenesi dell'Appennino settentrionale. RER ed ENI – Agip, (1998) e Fava et al. (2005) hanno evidenziato per l'area padana a sud del Po un assetto idrogeologico intimamente connesso alla formazione del bacino peristrutturale padano. L'idrogeologia è schematizzabile mediante un acquifero multifalda caratterizzato da tre unità idrostratigrafiche (Gruppo Acquifero A superficiale, Gruppo Acquifero B intermedio, Gruppo Acquifero C profondo) sostenute da discontinuità stratigrafiche principali (impermeabili relativi come ad esempio l'orizzonte di Fossolo che separa l'Acquifero A dall'Acquifero B).

1.3 Le metodologie impiegate

Le metodologie di misura attualmente disponibili, quali l'interferometria SAR e il GPS (Progetti ESA-CAT1 3840 e ESA-CAT1-2796 del 2006), consentono di descrivere il fenomeno della subsidenza con grande precisione e soprattutto con risoluzione spaziale e temporale. Queste informazioni, opportunamente elaborate e integrate con la ricostruzione geologica e idrogeologica degli acquiferi sotterranei e con il rilevamento dei dati di carattere piezometrico su una vasta rete di pozzi distribuiti su tutta l'area, consentono di comprendere il fenomeno in tutti i suoi aspetti ed eventualmente ridurne l'entità regolamentando maggiormente i processi di estrazione.

Al fine di monitorare l'estensione e l'entità del fenomeno della subsidenza è stata compiuta una analisi multitemporale con dati di interferometria SAR. Tale tecnica può consentire, tra l'altro, una più adeguata valutazione dei volumi di acqua estratta dedotti dal calcolo dei volumi di mezzo poroso soggetti ad isospostamento. Una valutazione preliminare condotta con la metodologia proposta da Galloway et al. (2000) indica infatti un deficit idrico di circa 50 – 100 milioni di m³/anno. La metodologia proposta da Galloway et al. (2000) indica che possono essere ottenute stime del deficit idrico considerando il volume annuo di sedimento subsidente e ciò rende le tecniche di indagine SAR particolarmente indicate per caratteristiche di dettaglio e completezza.

2. UTILIZZO DELLA TECNICA DI InSAR-SBAS

La tecnica di elaborazione del segnale SAR (Synthetic Aperture Radar) nota come Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) è diffusamente utilizzata nello studio di singoli fenomeni deformativi dovuti ad eventi sismici (Gabriel et al. 1989; Massonet et al. 1993; Stramondo et al. 1999). Recentemente l'argomento di maggiore interesse è divenuta l'analisi dell'evoluzione nel tempo di un processo deformativo tramite tecniche interferometriche. A tale scopo sono state sviluppate differenti procedure di trattamento del segnale SAR (Crosetto et al., 2005; Ferretti et al. 2000;

Hooper et al. 2004; Mora et al. 2003; Usai et al. 2003; Werner et al. 2003). Una possibile procedura è basata sull'utilizzo di un elevato numero di dati SAR e sul susseguente calcolo di una serie di interferogrammi differenziali, caratterizzati dalla proprietà di avere una ridotta distanza spaziale tra le posizioni orbitali (baseline spaziale). Ciò consente di limitare la decorrelazione spaziale e gli errori topografici. Tale tecnica DInSAR è nota come SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002). Essa implementa la combinazione di un set di interferogrammi differenziali per generare una mappa di velocità di deformazione media e serie temporali di spostamento. La scelta delle immagini SAR utilizzate è dettata dalla necessità di ridurre i fenomeni di decorrelazione (Zebker e Villasenor, 1992) e di ottenere il maggior numero possibile di pixel coerenti. Pertanto la scelta dei dati è stata effettuata scegliendo un limite superiore alla baseline spaziale e temporale per ciascuna coppia di orbite. Il dataset SAR è stato geometricamente coregistrato su di un'immagine SAR di riferimento o "immagine master" (orbita 10769, 12 maggio 1997). Successivamente sono stati calcolati tutti gli interferogrammi differenziali ottenuti in base ai precedenti vincoli. Ad essi è stato applicato un algoritmo di srotolamento della fase o "phase unwrapping" sviluppato da Costantini e Rosen (1999) e migliorato tramite lo sviluppo di una procedura che massimizza la propagazione in aree a bassa coerenza (Casu et al. 2006). Per risolvere il sistema lineare che ne deriva si applica quindi una decomposizione a valori singolari o SVD (Singular Value Decomposition). La stima dell'evoluzione temporale della deformazione, ottenuta a questo punto della procedura (si veda il diagramma a blocchi in Figura 1, modificato da Casu et al. 2006), è affetta da artefatti atmosferici ed errori orbitali. Poiché si è osservato che il segnale atmosferico è correlato nello spazio ma debolmente nel tempo (Ferretti et al. 2000), si applica un filtraggio Low Pass spaziale, High Pass temporale. Tale filtraggio sarà utile anche ad eliminare o ridurre gli eventuali problemi orbitali, il cui comportamento spazio-temporale è analogo. Per eliminare il contributo di fase topografica è stato utilizzato un Modello Digitale di Elevazione (DEM) con circa 10 m di accuratezza, fornito dall'Istituto Geografico Militare. La tecnica DInSAR SBAS è stata applicata ad una porzione dell'Appennino emiliano e della Pianura Padana per rilevare e studiare l'evoluzione nel tempo della deformazione del suolo. La tecnica utilizzata consente di quantificare la media annua degli spostamenti del suolo per ciascun pixel coerente con accuratezze dell'ordine di alcuni millimetri, oltre a fornire la serie storica per ognuno di essi (Berardino et al. 2002; Lanari et al. 2004). Il periodo coperto dalle immagini SAR è di circa 8 anni, dal 1992 all'inizio del 2000. L'area in cui la mappa delle velocità medie individua i massimi ratei di subsidenza si colloca a ridosso dell'area urbana di Bologna, principalmente lungo l'arco delle periferie che bordano la città antica (Fig. 2). In questa zona la deformazione media è compresa tra i 2-5 mm/anno lungo il settore pedemontano dell'Appennino emiliano, a ridosso dell'anticlinale, fino a raggiungere i 40-50 mm/anno (con punte di 59 mm/anno) nelle zone in cui sono più accentuati i prelievi di acqua per l'industria, per l'agricoltura e per gli impieghi civili. Nelle altre aree urbane della Regione Emilia-Romagna la tecnica DInSAR misura velocità medie inferiori, pur evidenziando valori significativi di subsidenza principalmente di origine antropica. Nell'area urbana di Bologna il fenomeno della subsidenza è stato studiato, oltre che con dati telerilevati, tramite la misurazione di caposaldi di livellazione. In particolare la Rete IGM è composta da 511 caposaldi a Bologna e dintorni (Rete IGM, 2004), misurati nel 1983, 1987, 1992 e 1999. Pertanto si è deciso di confrontare i dati di queste ultime due campagne con i dati DInSAR, essendo peraltro comparabili i rispettivi intervalli temporali (Fig. 3). Il confronto tra le deformazioni misurate con le due tecniche evidenzia una elevata convergenza di risultati. Infatti la differenza tra i dati di livellazione, proiettati lungo la linea di vista del SAR (Line Of Sight), e le misure DInSAR, ha una deviazione standard $\sigma = 2.0$ mm/anno. Tale valore è in assoluto accordo con quanto stimato da Casu et al. (2006), che ha comparato misure di deformazione ottenute con tecniche DInSAR e misure di livellazione.

3. LA RETE DI MONITORAGGIO PIEZOMETRICO

La rete di monitoraggio piezometrico, istituita a partire dal 1976 dalla Regione Emilia-Romagna e attualmente gestita dall'ARPA, è composta da circa 600 pozzi artesiani distribuiti su tutta la regione e caratterizzati da una profondità media di circa 150 m (Fava et al., 2005). L'alta densità di pozzi

presenti, circa uno ogni 15 Km², permette azioni di monitoraggio e controllo sulle principali tendenze evolutive degli acquiferi profondi presenti su tutto il territorio. Inizialmente, nel periodo 1976 – 1998, venivano eseguite 4 misure di livello all'anno; successivamente nel biennio 1999 – 2000 il monitoraggio è stato interrotto per essere ripreso a partire dal 2001 con solo due misure annuali. La rete istituita consente sia il monitoraggio degli acquiferi presenti nella fascia delle conoidi, situata a sud della via Emilia, che degli acquiferi presenti nelle aree di bassa e media pianura a nord della via Emilia. La fascia delle conoidi è caratterizzata da elevati valori di permeabilità che consentono fenomeni di ricarica a carattere stagionale. A differenza dei precedenti, gli acquiferi ubicati nelle aree di bassa e media pianura, sono caratterizzati da valori di permeabilità molto bassi e quindi difficilmente soggetti a fenomeni di ricarica, come dimostrato anche dalla datazione con tecniche isotopiche, delle acque presenti che collocano la loro età tra i 5000 e 50.000 anni circa (Martinelli et al. 1998; Chahoud et al. 2002). Lo studio dell'evoluzione temporale del livello delle acque presenti in questo tipo di acquiferi, caratterizzati da marcate condizioni di confinamento, potrebbe fornire interessanti informazioni per comprendere l'evoluzione dei processi di subsidenza presenti nell'area.

3.1 Analisi dei dati piezometrici

La condizione di confinamento verificata su numerosi acquiferi compresi tra il fiume Po e la via Emilia (Chaoud et al., 2002) può permettere particolari elaborazioni orientate a comprendere le tendenze evolutive delle quote piezometriche. Gli acquiferi di carattere confinato possono infatti essere utilizzati come misuratori naturali di deformazione crostale (Bodvarsson, 1970). L'analisi delle quote piezometriche in pozzi selezionati della rete di monitoraggio può contribuire a identificare le cause naturali e antropiche che originano fluttuazioni nel tempo del livello dell'acqua. Da un'analisi preliminare delle caratteristiche dei pozzi presenti in Regione risulta che la popolazione dei pozzi è molto eterogenea, sia come distribuzione geografica che come periodo e numero di osservazioni eseguite. In particolare è emerso che un numero non trascurabile di pozzi ha un periodo di osservazione molto breve con un esiguo numero di misure. La stima dell'andamento nel tempo del livello piezometrico non risulta attendibile e quindi i loro dati sono stati esclusi dall'analisi. I dati analizzati si riferiscono a 105 pozzi la cui posizione è mostrata in Figura 4. Questi pozzi sono caratterizzati tutti da un intervallo di osservazione che va dal 1976 al 2004; in questo periodo è stato eseguito un numero di misure generalmente superiore ad 80. Per ogni singolo pozzo è stata eseguita una media delle osservazioni annuali allo scopo di ridurre eventuali effetti stagionali. E' stato stimato l'andamento nel tempo a lungo periodo del livello piezometrico mediante un'interpolazione lineare ai minimi quadrati. I valori rappresentano la velocità di abbassamento (se negativi) o innalzamento (se positivi) del livello dell'acqua nei pozzi rispetto al livello medio del mare. Per poter meglio studiare la distribuzione spaziale dell'andamento nel tempo del livello dei pozzi ed eventualmente cercare di correlare questo tipo di informazione con l'evoluzione dei processi di subsidenza, è stata realizzata una mappa di velocità del livello piezometrico interpolando le velocità stimate su una griglia regolare di punti con opportuni algoritmi matematici (Fig. 5). Si può notare come il livello dei pozzi nelle province di Ferrara e Ravenna risulta sostanzialmente stabile o in lento innalzamento (0.1 – 0.2 metri/anno), mentre in corrispondenza delle province occidentali (da Bologna a Parma) il livello si abbassa di circa 0.5 metri all'anno. Confrontando questa distribuzione con quella ottenuta dal censimento dei prelievi da falda eseguito dall'ARPA Emilia Romagna (Fig. 6), risulta evidente come le aree caratterizzate da alti consumi (ad esempio: Parma, Reggio Emilia, Modena e Bologna) coincidono con le zone in cui il livello degli acquiferi si abbassa con velocità maggiori (Fig. 5). Inoltre, confrontando le precedenti distribuzioni (Fig. 5 e 6) con il campo di velocità di abbassamento, ottenuto da dati di livellazione e GPS (Bitelli et al., 2005), si nota una buona correlazione spaziale tra le aree in subsidenza e le aree dove velocità di abbassamento del livello piezometrico e prelievo da falda sono maggiori. Ulteriori studi e campagne di misura sono necessari per delimitare spazialmente e temporalmente con maggiore risoluzione le aree in cui sono evidenti queste correlazioni e poter quindi disporre di un valido strumento di controllo del territorio e delle sue risorse. Per poter

comprendere meglio quale relazione lega il livello piezometrico dei pozzi artesiani al processo di subsidenza è necessario analizzare con cura anche gli eventuali segnali periodici significativi che possono essere presenti nelle serie temporali delle misure del livello di ciascun pozzo. Questi segnali sono stati interpretati come l'effetto dei processi deformativi in atto nella Regione e quindi utilizzabili come 'strainmeters naturali' (Bodvarsson, 1970; Albarello e Martinelli, 1994). Riprendendo il lavoro svolto da questi autori è stato eliminato dalle serie temporali delle misure piezometriche annuali di ciascun pozzo l'andamento di lungo periodo (velocità), ottenendo dei valori residui distribuiti attorno al valore 0. Per minimizzare gli effetti locali di origine antropica, invece di analizzare l'andamento nel tempo dei residui di ogni singolo pozzo, sono stati selezionati alcuni punti ritenuti rappresentativi (Fig. 7), in corrispondenza dei quali è stato calcolato il livello piezometrico residuo locale. Questo livello è stato ottenuto calcolando la media tra i valori dei livelli residui di tutti i pozzi situati ad una distanza inferiore ai 15 Km da ciascun punto. In questo modo il livello piezometrico locale è rappresentativo di circa 5-6 pozzi diversi. Le serie temporali di questi quattro punti sono state analizzate con un algoritmo in grado di individuare segnali periodici significativi all'interno di serie temporali anche non campionate regolarmente (Lomb 1976). Da questa analisi è emerso che in tutti i punti il segnale principale individuato ha un periodo di circa 8 anni (Fig. 8a e Fig. 8b). Tale periodo coincide con quello determinato da Albarello e Martinelli (1994) su una analoga popolazione di pozzi artesiani.

4. LA RETE DI MONITORAGGIO GPS

Un ulteriore miglioramento all'approccio multidisciplinare nello studio della subsidenza è fornito dall'utilizzo del sistema di posizionamento globale GPS. La rete GPS attualmente esistente in Regione, e gestita dal Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, Trasporti, Acque e Rilevamento del Territorio dell'Università di Bologna congiuntamente con ARPA, è costituita principalmente da vertici che vengono misurati saltuariamente. Per migliorare il data set disponibile sono in corso di definizione progetti orientati al potenziamento della rete GPS già esistente introducendo nuove stazioni permanenti e non. Alcune stazioni permanenti risultano già attive con almeno 1 anno di dati mentre altre per una maggiore copertura del territorio devono essere ancora realizzate (Fig. 9). Questi siti consentiranno un monitoraggio continuo dell'evoluzione temporale della quota di un punto e quindi potranno fornire informazioni molto dettagliate sull'evoluzione temporale del processo di subsidenza. Potranno inoltre essere utilizzate come vincolo nell'elaborazione di immagini differenziali SAR. Per quanto riguarda la rete di stazioni non permanenti, la finalità di queste misure è quella di aumentare la risoluzione spaziale dell'indagine nelle aree interessate dagli acquiferi principali, oppure in zone caratterizzate da un'evoluzione temporale rapida dei processi di subsidenza.

5. CONCLUSIONI

Le misurazioni ottenute con tecniche di DInSAR hanno consentito di studiare l'evoluzione nel tempo degli spostamenti del suolo. Inoltre il confronto con misure di livellazione IGM mostrano una ottima corrispondenza. I dati attualmente analizzati evidenziano, in prossimità della fascia pedemontana delle colline bolognesi (anticlinale del M. Sabbiuno), valori minimi di subsidenza naturale valutabile in 2 – 4 mm/anno. Procedendo radialmente da tale area verso nord e verso i fiumi Reno e Savena si registra un aumento dell'abbassamento del suolo imputabile ad un maggiore sfruttamento (subsidenza antropica), proprio dove si ha un maggior aumento dello spessore dei Gruppi acquiferi A e B. Questa subsidenza è valutabile in 50 – 60 mm/anno. Stramondo et al. (2006) hanno, tra l'altro, concorso ad una migliore comprensione del fenomeno considerando anche possibili contributi alla subsidenza di origine naturale. L'analisi dei dati provenienti dalla rete di monitoraggio piezometrico ha evidenziato un diverso comportamento della quota di falda tra le province orientali (Ferrara e Ravenna), in cui risulta stabile o in lento sollevamento (0.1-0.2 m/anno), e quelle occidentali (Bologna, Modena, Reggio Emilia e Parma) dove invece la quota si abbassa (0.5 m/anno), in modo significativo. In queste province i consumi da falda risultano essere particolarmente elevati e i dati di livellazione e GPS indicano un marcato processo di subsidenza.

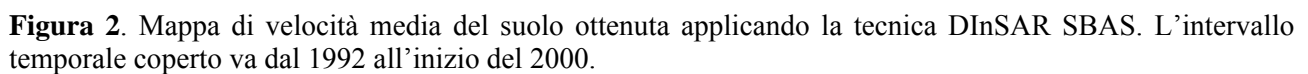
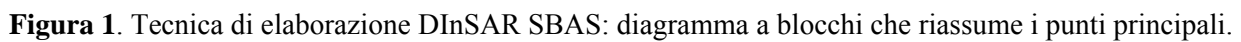
Esiste un'evidente correlazione tra le zone caratterizzate da abbassamento della quota piezometrica e processi di subsidenza e aree affette da forte estrazione di acque sotterranee. Sono state anche evidenziate variazioni periodiche della quota piezometrica associabili a movimenti di carattere tettonico. Tali valutazioni risultano utili per una migliore interpretazione della dinamica temporale delle quote piezometriche. La necessità di individuare e monitorare con maggiore risoluzione temporale e spaziale le aree maggiormente soggette a fenomeni di subsidenza o ad altri movimenti di carattere tettonico (Stramondo et al., 2006) richiede l'uso integrato delle moderne metodologie quali la DInSAR e le reti GPS permanenti e non permanenti. La comprensione del fenomeno in tutti i suoi aspetti potrà essere ottenuta analizzando la ricostruzione tridimensionale degli acquiferi sotterranei e rilevando i dati piezometrici su una vasta rete di pozzi distribuiti su tutta l'area. Ciò consentirà di regolamentare i processi di estrazione al fine di ridurre la subsidenza nelle aree dove il fenomeno ha raggiunto valori eccessivi.

6. BIBLIOGRAFIA

- Amorosi A., Farina M., Severi P., Preti D., Caporale L., Di Dio G. (1996). Genetically related alluvial deposits across active fault zones: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper quaternary of the southern Po Basin, Italy. *Sedimentary Geology*. **102**: 275-295.
- Albarelo D. and Martinelli G. (1994) Piezometric levels as possible geodynamic indicators: analysis of the data from a regional deep waters monitoring network in Northern Italy, *Geophysical Research Letters*. 21. **18**: 1955-1958.
- Berardino P, Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002). A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. **40**: 2375-2383.
- Bitelli G., Bonsignore F., Vittuari L. (2005). Il monitoraggio della subsidenza in Emilia Romagna. *Aquifer Vulnerability and Risk, 2nd International Workshop*.
- Bodvarsson G. (1970). Confined fluids as strain meters. *J. Geophys. Res.* **75**: 2711-2718.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., P. Severi P, Vannucci G. (2004). Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna. Scala 1:250.000. Note Illustrative, *Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, Regione Emilia Romagna*, SELCA-Firenze.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzaretto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G., Postpischl D. (1985). Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines. *Tectonophysics*. **117**: 7-38.
- Boccaletti M., Sani F. (1997). Cover thrust reactivations related to internal basement involvement during Neogene-Quaternary evolution of the Northern Apennines. *Tectonics*. **17**: 112-130.
- Carminati E., Martinelli G. (2002). Subsidence rates in the Po Plain, Northern Italy: the relative impact of natural and anthropic causation. *Engineering Geology*. **66**: 241-255.
- Carminati E., Martinelli G., Severi P. (2003). Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain (Northern Italy): insights from ¹⁴C ages. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 4. 10. **1082**: 10.1029/2002GC000481.
- Casu F., Manzo M., Lanari R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*. **102**: 195-210.
- Castellarin A., Eva C., Giglia G., Vai G.B., Rabbi E., Pini G.,A., Crestana G. (1985). Analisi strutturale del fronte appenninico padano. *G. Geol.* **47**: 47-75
- Chahoud A., Fava A., Martinelli G. (2002) Progetto operativo monitoraggio acque. Indagine di Idrologia Isotopica. *Regione Emilia Romagna – ARPA Emilia – Romagna, SINA*, Bologna.
- Costantini, M., Rosen, P. A. (1999). A generalized phase unwrapping approach for sparse data. *IGARSS'99 Proc.*, Hamburg (Germany). 267-269.
- Crosetto M., Crippa B., Biescas E. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*. **79**. **1-2**: 81-91.

- Dadomo A., Martinelli G. (2005). Aspetti di idrologia isotopica in Emilia - Romagna. *Atti dei Convegni Lincei*. **216**: 157-166.
- Doglioni C. (1993). Some remarks of the origin of foreedps. *Tectonophysics*. **228**: 1-20.
- Fava A., Farina M., Marcaccio M. (2005). Le caratteristiche degli acquiferi della Regione Emilia-Romagna. *Report 2003. Regione Emilia Romagna, ARPA*, Scandiano, 242.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000). Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions Geosciences Remote Sensing*, **38**, 5.
- Gabriel A., Goldstein, R., Zebker, H. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal Geophysical Research*. **94**: 9183–9191.
- Galloway D.L. Jones D.R., Ingebritsen S.E.(2000). Land subsidence in the united States. *USGS Fact Sheet-165-00*. Reston.
- Hooper A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*. **31**. **L23611**:10.1029/2004GL021737.
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J., Berardino P., Sansosti E. (2004). A Small Baseline Approach for Investigating Deformations on Full Resolution Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. **42**: 1377-1386.
- Lomb NR. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics Space Sciences*. **39**: 447-462.
- Mariotti G., Doglioni, C. (2000). The dip of the foreland monocline in the Alps and Apennines. *Earth and Planetary Science Letters*. **181**: 191-202.
- Martinelli G., Minissale A., Verrucchi C. (1998). Geochemistry of heavily exploited aquifers in the Emilia-Romagna region (Po valley, northern Italy). *Environmental Geology*. **36**: 195-206.
- Massonet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rte T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*. **364**: 138-142.
- Mora O., Mallorquí J. J., Broquetas A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE on Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. **41**: 2243–2253.
- Pieri M. (1983). Three seismic profiles through the Po Plain. In: Seismic Expression of Structural Styles. A Picture and Work Atlas (A.W. Bally, ed). *Am. Assoc. Pet. Geol. Stud. Geol.* **15**: 3.4.1/8–3.4.1/26.
- Pieri M. Groppi, G. (1981). Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). *C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica*. **414**: 1-13.
- Rete IGM (2004), Rete Grande Bologna, Rete Raffinamento Bologna, Rete Autorità di Bacino del Reno, Rete Provinciale, Rete Regionale, *Comune di Bologna*.
- RER e ENI - Agip (1998). Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia – Romagna. *Regione Emilia – Romagna - ENI divisione Agip*, S.EL.CA., Firenze, 120.
- Stramondo S., Saroli M., Tolomei C., Moro M., Doumaz F., Pesci A., Loddo F., Baldi P., Boschi E. 2006, Surface movements in Bologna (Po Plain - Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment- Elsevier Science Journals*. (Sottomesso)
- Stramondo S., Tesauro M., Briole P., Sansosti E., Salvi S., Lanari R., Anzidei M., Baldi P., Fornaro G., Avallone A., Buongiorno M.F., Franceschetti G., Boschi E. (1999). The September 26, 1997 Colfiorito, Italy, earthquakes: modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS. *Geophysical Research Letters*. **26**, **7**: 883-886.
- Usai S. (2003). A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. **41**, **4**: 753–760.
- Werner C., Wegmuller U., Strozzi T., Wiesmann A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proceedings of IGARSS '03*. **7**: 4362–4364.
- Zebker H.A., Villasenor J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. **30**: 950-959.

tempo



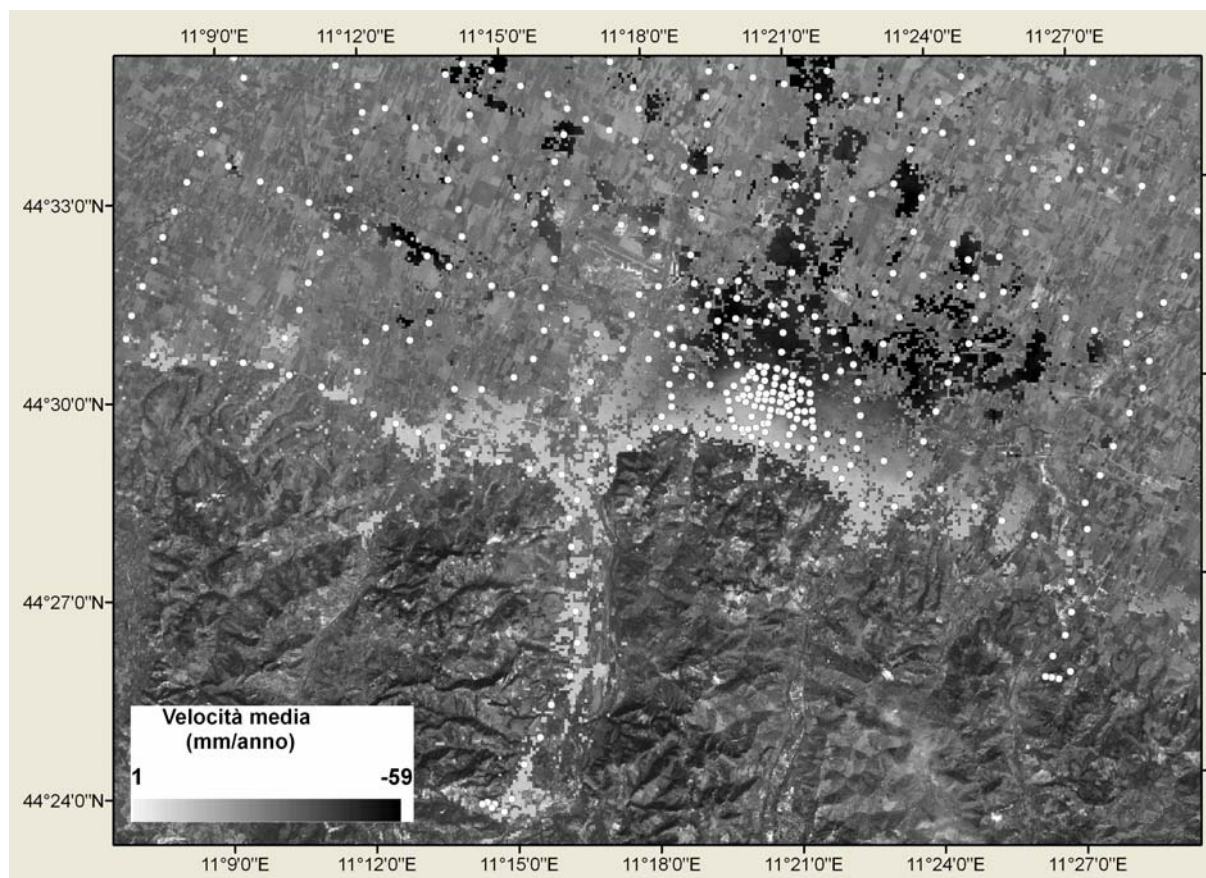


Figura 3. Mappa di velocità media del suolo e caposaldi di livellazione (punti bianchi) nell'area urbana di Bologna.

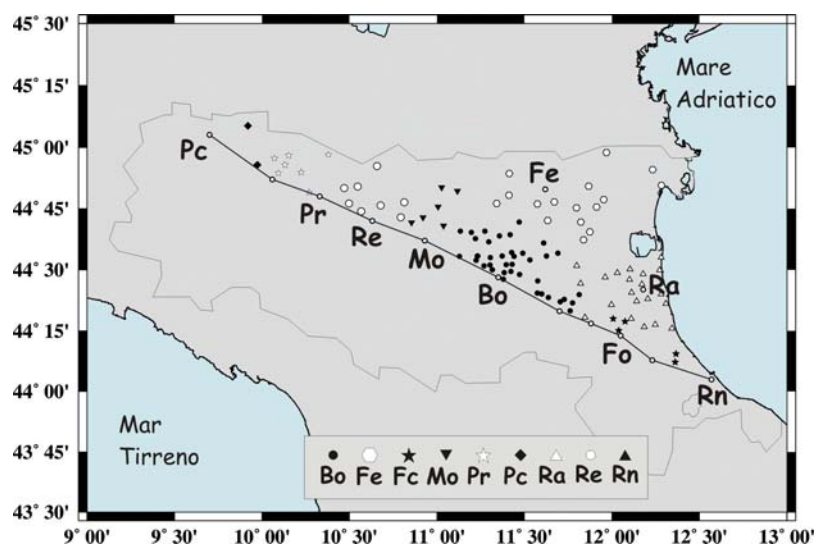


Figura 4. Distribuzione dei 105 pozzi artesiani della rete di monitoraggio ARPA situati a nord della via Emilia con un periodo di osservazione dal 1976 al 2004 e con un minimo di 80 misure.

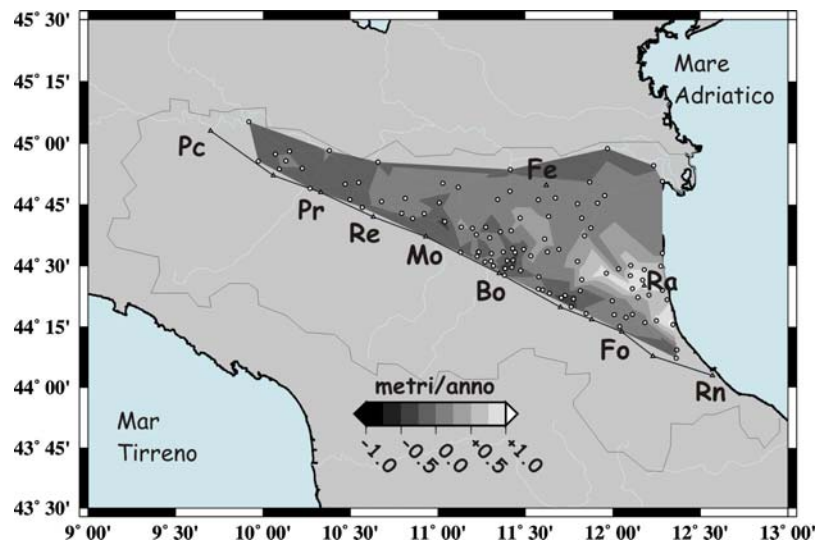


Figura 5. Campo di velocità interpolato di abbassamento (negativi) o innalzamento (positivi) del livello piezometrico medio dei pozzi.

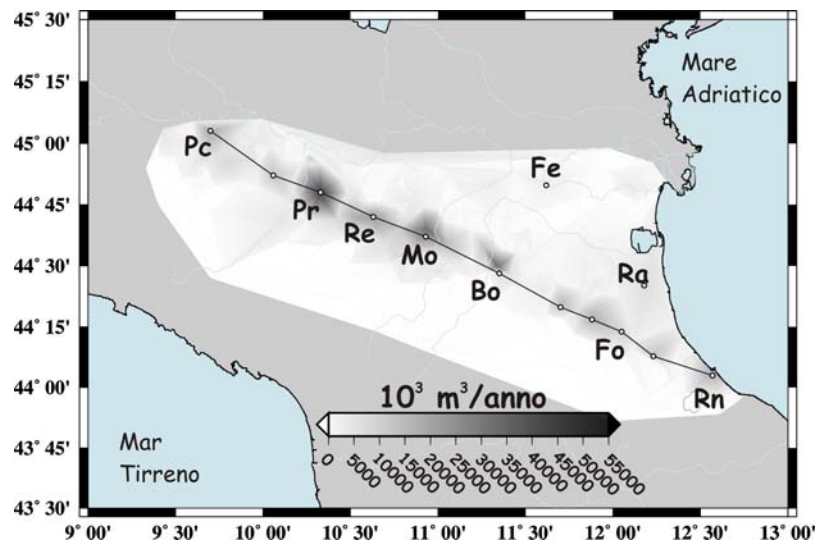


Figura 6. Distribuzione dei consumi di acque prelevate da falda nella regione Emilia Romagna (dati ARPA).

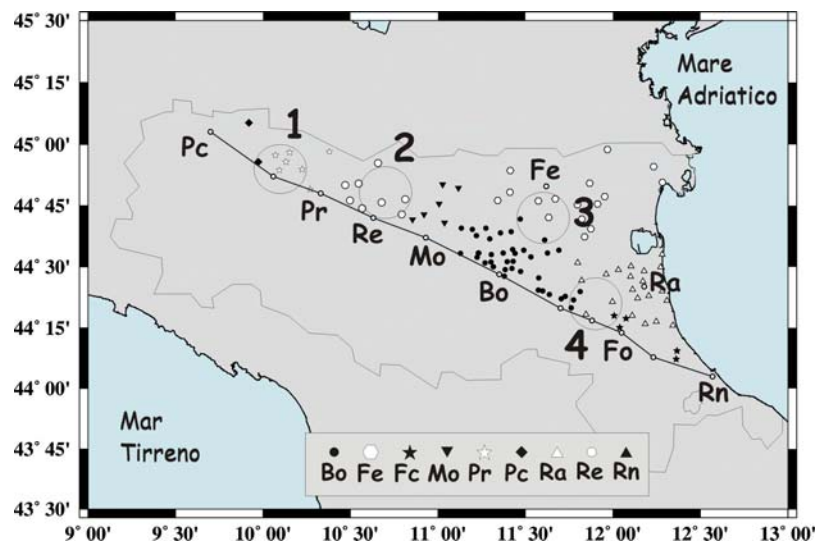


Figura 7. Posizione dei punti in cui è stata calcolata la quota piezometrica residua locale e successivamente sono stati ricercati eventuali segnali periodici significativi.

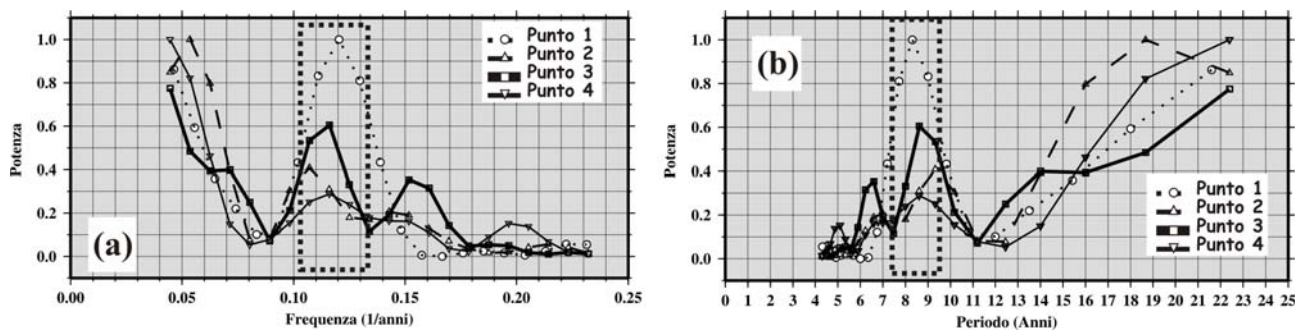


Figura 8. Periodogramma ottenuto analizzando la serie temporale delle quote piezometriche residue nei punti di Figura 7, (a) nel dominio delle frequenze e (b) nel dominio del tempo. L'area tratteggiata indica il valore massimo, considerando solo i segnali con periodi inferiori a metà dell'intero intervallo di tempo considerato.

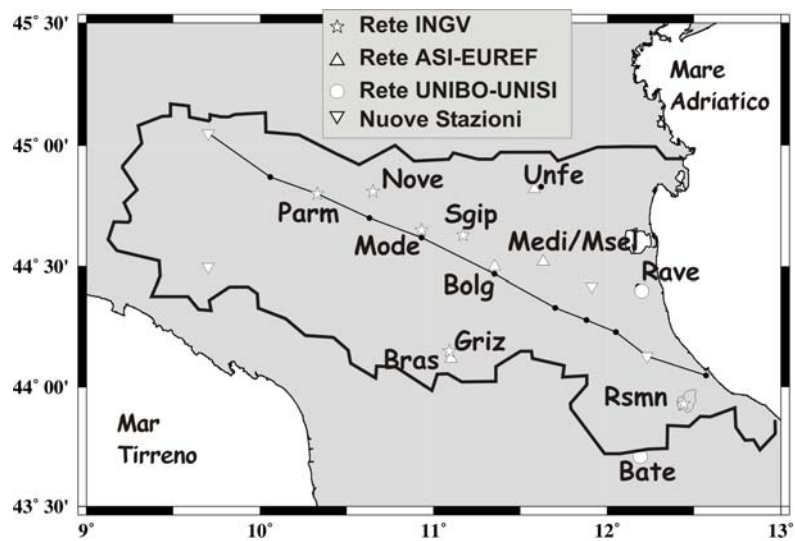


Figura 9. Distribuzione delle stazioni GPS permanenti attualmente attive e quelle in fase di progetto.